

基于 ANSYS Workbench 热板电加热与油加热模拟及对比分析

杨 彬¹, 孙宝寿^{1*}, 张雅灵², 张辉斌²

(1. 宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211; 2. 东毓(宁波)油压工业有限公司, 浙江 宁波 315200)

摘要: 为改善平板硫化机热板表面温度场分布的均匀性, 对规格为 75 mm×2 400 mm×2 400 mm 的平板硫化机热板进行了有限元模拟. 利用 ANSYS Workbench 软件分别模拟热板电加热与导热油加热情况, 并进行对比分析. 结果表明, 针对同一块热板在加热到 190 °C 工作温度左右时, 电加热热板表面温差为 12.012 °C, 导热油加热热板表面温差为 9.2 °C. 模拟分析结果表明, 采用导热油加热热板表面温度均匀性更高、升温速率更快; 且入口流速在 4 m·s⁻¹ 时, 温度场均匀性得到明显改善.

关键词: 热板; 电加热; 导热油加热; Workbench 软件

中图分类号: TQ330.47

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2017) 05-0013-06

平板硫化机热板加热方式主要有电加热、导热油加热、蒸汽加热、感应加热等. 作为橡胶机械的一种关键硫化设备, 主要功能是提供硫化所需的温度和压力. 热板一般采用碳钢作为材料, 拼焊而成的热板在焊接后应进行低温回火处理, 消除焊接应力. 对于电加热热板而言, 其中间有一排孔道, 孔道用于放置热管; 对于流体加热热板, 在孔的一端焊接有挡板, 在内部形成贯通的流道. 高温流体从流道入口流入, 出口流出, 从而对热板进行加热升温, 热板温度传导给模板以提供硫化所需的温度. 硫化温度是硫化三大要素之一, 也是橡胶进行硫化反应的基本条件, 直接影响橡胶硫化速率和制品质量. 硫化温度每上升 8~10 °C, 其反应速率约增加 1 倍, 也即时间约减少一半; 因此对热板表面有温度均匀性的要求. 热板表面温差应尽可能小, 才能保证硫化产品的质量.

运用传热学基础理论, 对电加热和导热油加热热板的传热问题进行模拟分析, 总结出导热油流速对传热速率及热板温度均匀性的影响. 近年来, 研究人员对此也进行了相关研究, 王野平等^[1]应用有限元软件 FLUENT 分析了热压板的温度分布情况, 找出了影响温度分布的原因及参数; 武晶

晶等^[2]应用 ANSYS 有限元软件对导热油加热的热板进行了瞬态分析, 得到了热板温度场及随时间变化情况; 吴文山等^[3]利用敏感度分析, 从热板功率分布误差方面对热板温度场进行了分析. 本文通过对同一热板不同加热方式的对比分析, 利用取点记录温度随时间的变化趋势, 从定量角度直观分析 2 种加热方式的不同特点, 并对油加热中关键因素流速进行了讨论, 对不同应用情况下加热方式及流速范围的选取具有一定的参考价值.

1 热板温度场模拟

1.1 传热边界基本理论

传热问题常见的边界条件可分为以下三类^[4].

第一类: 规定沿导热物体边界面上的温度值, 如 $\tau > 0, t_w = f(x, y, z, \tau)$, 这种边界条件简称为恒壁温边界条件, 式中, τ 表示时间; t_w 表示固体表面的平均温度.

第二类: 规定导热物体边界面上的热流密度, 如 $\tau > 0, q_w = -\lambda \partial t / \partial n|_w = f(x, y, z, \tau)$, 其实质是给定边界面上的温度梯度. 式中, τ 表示时间; q_w 表示热流密度值; λ 表示导热体的导热系数值; t 表示温度; n 表示边界面上某处的外法线方向.

收稿日期: 2016-12-07.

宁波大学学报(理工版) 网址: <http://journal.g.nbu.edu.cn/>

基金项目: 宁波市产业技术创新重大专项 (2015B11045).

第一作者: 杨彬 (1990—), 男, 湖北大冶人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 塑性成形工艺与装备. E-mail: jodening@126.com

*通信作者: 孙宝寿 (1960—), 男, 江苏泰兴人, 副教授, 主要研究方向: 塑性成形工艺与装备. E-mail: sunbaoshou@nbu.edu.cn

第三类:规定流体温度及流体与物体换热面之间的对流换热系数,如 $-\lambda \partial t / \partial n|_w = h(t_w - t_f)$,流体温度和表面换热系数可随地点和时间的变化而变化,也可为恒定不变的常数.式中, λ 表示导热体的导热系数; n 表示边界面上某处的外法线方向; h 表示对流换热系数; t_f 表示流体温度; t_w 表示固体表面的平均温度.

1.2 热板传热模型基本假设

基于实际情况,对传热模型作如下基本假设:

(1)周围空气温度保持稳定,空气与热板初始温度定义为 23°C ;

(2)电加热时,假设电热管热量全部传递至热板,不考虑其中的热传递效率损失部分;

(3)油加热时,流固接触表面以热流导热形式对热板输出热量,非工作表面以对流换热方式进行热量交换;

(4)不考虑热量传递过程中的热辐射及流体材料物性参数以及边界条件随温度的变化^[5].

另外,为便于有限元网格划分,依据圣维南原理,对几何模型进行合理简化,去除了螺纹孔、倒角、小圆角等细节.

1.3 电加热有限元模拟

模拟采用的电加热热板尺寸为 $75\text{ mm} \times 2\,400\text{ mm} \times 2\,400\text{ mm}$,通道直径为 22 mm ,通道间距为 80 mm ,利用Solidworks软件进行三维建模,结构示意图如图1所示.

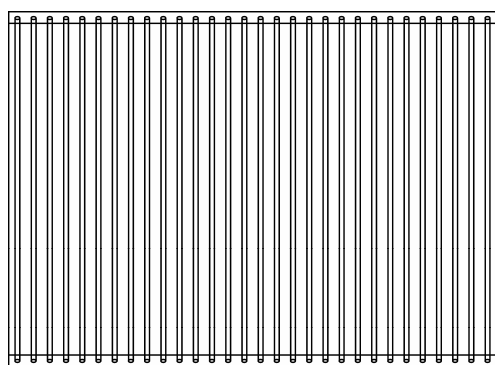


图1 电加热热板三维结构示意图

热板材料45号钢热物性参数:密度 ρ 为 $7\,850\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,换热系数 h 为 $8.45\text{ W}\cdot(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})^{-1}$;比热容 C_p 为 $465\text{ J}\cdot(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})^{-1}$,导热系数 λ 为 $50.5\text{ W}\cdot(\text{m}\cdot^\circ\text{C})^{-1}$.为提高模拟结果精度,考虑电加热时热物性参数随温度变化而变化,相关参数见表1.

表1 材料热物性参数随温度变化表

热物性参数	温度/ $^\circ\text{C}$		
	0	100	200
比热容 $C_p/(\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})^{-1})$	465	480	495
导热系数 $\lambda/(\text{W}\cdot(\text{m}\cdot^\circ\text{C})^{-1})$	50.5	47.5	44.8

利用Solidworks软件对热板进行三维建模,然后导入ANSYS APDL进行网格划分.因热板尺寸较大,网格划分局部如图2所示,热板电加热方式采用第二类边界条件,即已知导热物体边界面上的热流密度值,利用初始热管功率分布对热板内孔施加相应的热流密度载荷,在其他表面施加表面与空气对流换热载荷.

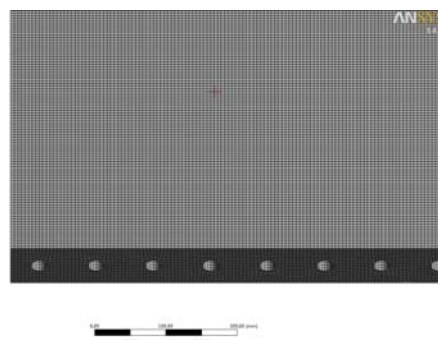
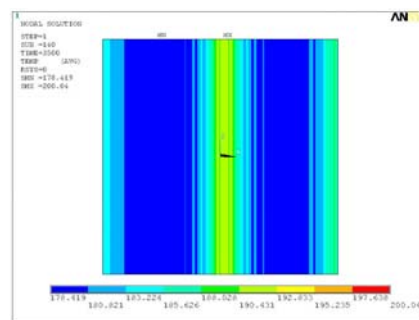
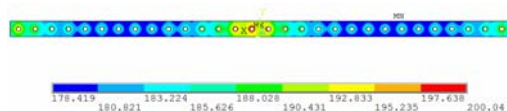


图2 电加热热板网格划分局部

利用热流密度公式求出不同功率下热管产生的热流密度载荷大小,即 $q = Q/S = Q/(2\pi r l)$,式中, Q 为热流即电热管功率; S 为热管孔内壁面积; r 为热管孔半径; l 为热管长度.在ANSYS中对内孔壁面施加相应热流密度载荷,由基本假设可知,热板和空气的初始温度为 23°C ,根据上下表面及两边与空气的对流换热系数 $8.45\text{ W}\cdot(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})^{-1}$ 来定义对流换热边界条件.根据热板实际工作情况,定义计算终止时间为 $3\,500\text{ s}$,设置完参数后,提交至ANSYS APDL中进行瞬态温度场求解^[6-8],其温度分布云图如图3(a)和(b)所示.



(a) 热板表面温度分布云图



(b) 热板侧面温度分布云图

图3 电加热热板温度分布云图

图3表明,热板加热至 190°C 左右,其表面温度场呈块状区域分布,两边及中间温度偏高.最高温度出现在两端热管与热板接触部位,最低温度位于热板表面;表面最高温度 190.431°C ,最低温度 178.419°C ,其表面温差达 12.012°C ,高于国家对于大尺寸热盘温差在 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 以内的相关标准.

1.4 导热油加热有限元模拟

导热油加热热板在电加热热板的基础上添加挡块,挡块固定在热管孔两侧,挡块四周与热板焊接密封.挡块通孔的一端与热管孔形成流道,另一端用六角螺钉将其堵住,形成封闭环路,防止导热油溢出.整体呈贯通的流道布置,整体结构示意图及挡块结构示意如图4和图5所示,其中,图4中的A表示导热油入口,B表示导热油出口,导热油流向如图中箭头所示;图4线框处如图5所示,为挡块流道示意图.

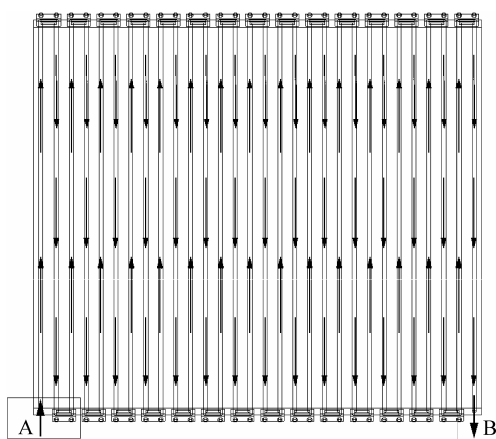


图4 导热油加热热板结构

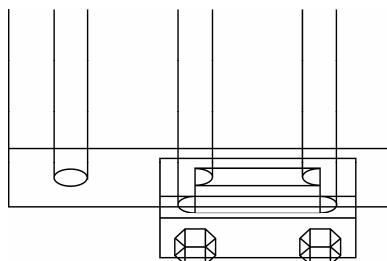


图5 挡块流道示意图

热板的内通道面与导热油的外表面为接触面,

热板与导热油非接触面为对流边界条件;热板导热油加热属于第三类边界条件,即规定流体温度及流体与物体换热面之间的对流换热系数.导热油类型为热煤油,定义其初始温度 200°C ,相应密度 $889\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,比热容 $2433.8\text{ J}\cdot(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})^{-1}$,导热系数 $0.105\text{ W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$,运动粘性系数 $2.6\text{ MPa}\cdot\text{s}$;取热板与空气的对流换热系数为 $8.45\text{ W}\cdot(\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C})^{-1}$,空气温度为 23°C ,入口边界条件为速度入口边界条件,在Fluent软件中采用默认设置的压力出口边界条件;热油泵流量为 $12\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$,入口速度由 $v=Q/(3600\times 2n\pi r^2)$ 计算^[9],式中, Q 表示热油泵流量; n 表示热压板个数; r 表示孔道半径.根据参数算得入口流速为 $2.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

利用Solidworks软件建立热板三维模型,导入Workbench软件Design Model建模软件中,定义进出口边界条件.使用Mesh工具进行网格划分,网格划分局部如图6所示.

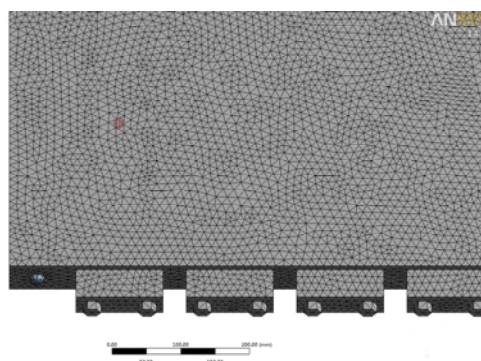


图6 导热油加热热板网格划分局部

将划分好网格的模型连接至Workbench中的Fluent流体分析模块,进行数值模拟分析.再通过热油泵将热油输送到热板中,其属于强制对流,在Fluent中使用RNG $k-\epsilon$ 湍流模型进行求解,时间步长设置为400步,其收敛精度为 e^{-7} .利用CFD Post后处理模块,将Fluent流体仿真结果数据导入后,得到导热油加热热板表面温度分布云图如图7所示^[10],热板表面温度场沿 X 轴从左至右温度分布点图如图8所示.

图形表明,加热至 190°C 左右,热板表面温度两边高中间低,最高温度出现在两端热管与热板接触部位,最低温度位于热板导热油出口处.根据云图显示的热力学温度数据减去 273 K 得到表面最高温度达 196.6°C .鉴于实际生产中,热板四周

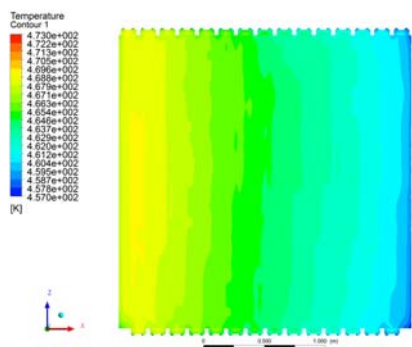


图7 导热油加热热板表面温度分布云图

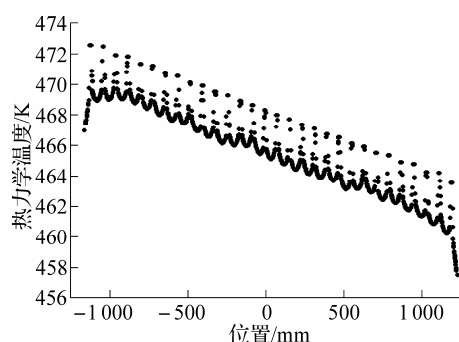


图8 沿X轴向温度分布点图

与模具热传导会留有一定余地, 因此最低温度为 187.4°C ; 其表面温差为 9.2°C , 在 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 以内, 符合相关规定。

2 电加热与导热油加热对比分析

通过对热板电加热与导热油加热进行的模拟分析, 表明在热板结构基本一致的条件下, 导热油

加热的热板表面热均匀性更好, 且导热油加热系统成本较低, 平均6个月左右更换1次, 能源利用率高; 而电加热受电热管制造水平的影响, 温度控制的稳定性不能有效保障。从左至右依次选取5个节点A、B、C、D、E来定量分析电加热热板与导热油加热热板在升温速率上存在的差异, 取点示意图如图9所示。

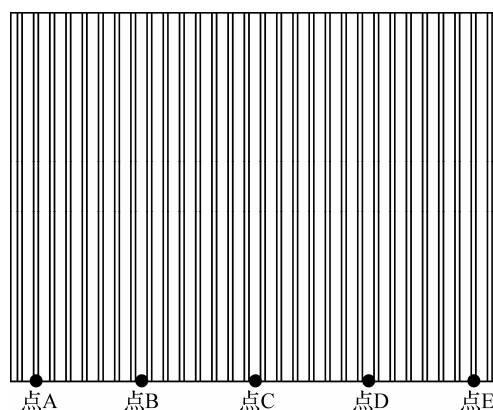


图9 取点示意图

以热板表面为基准面, 从左至右依次选取的5个节点A、B、C、D、E, 记录模拟过程中各点在不同时间段或迭代次数下的温度值, 因热板初始温度和最终温度接近一致, 故将时间步与迭代步进行分段对应比较。通过对比电加热与煤油加热时各点温度随时间变化情况, 来分析不同加热方式下温度场的变化规律, 其温度随时间变化曲线分别如图10所示。

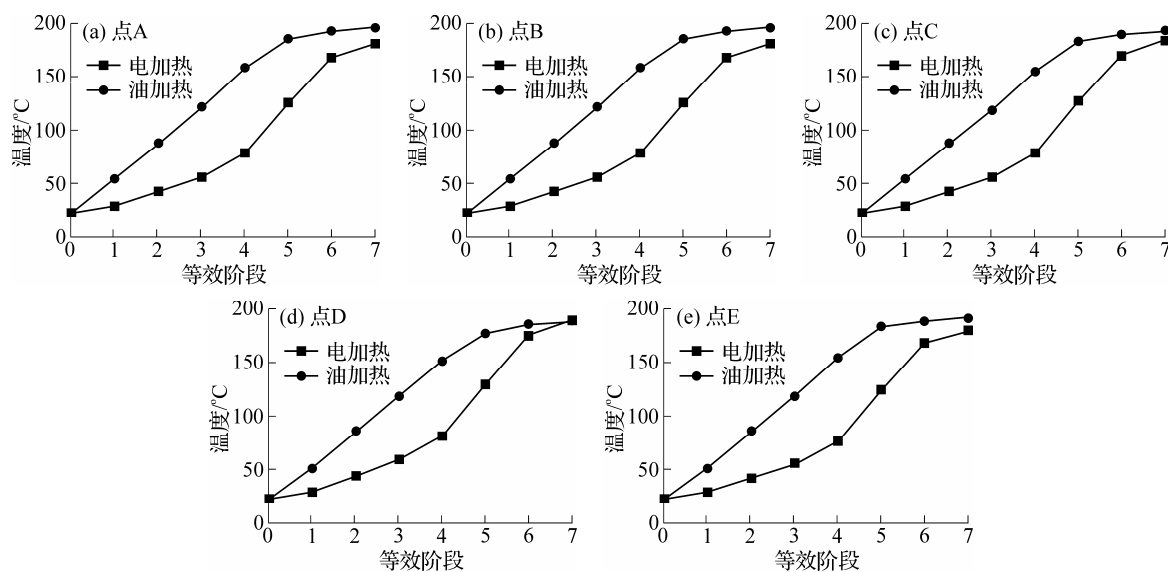


图10 不同节点的温度随时间变化曲线

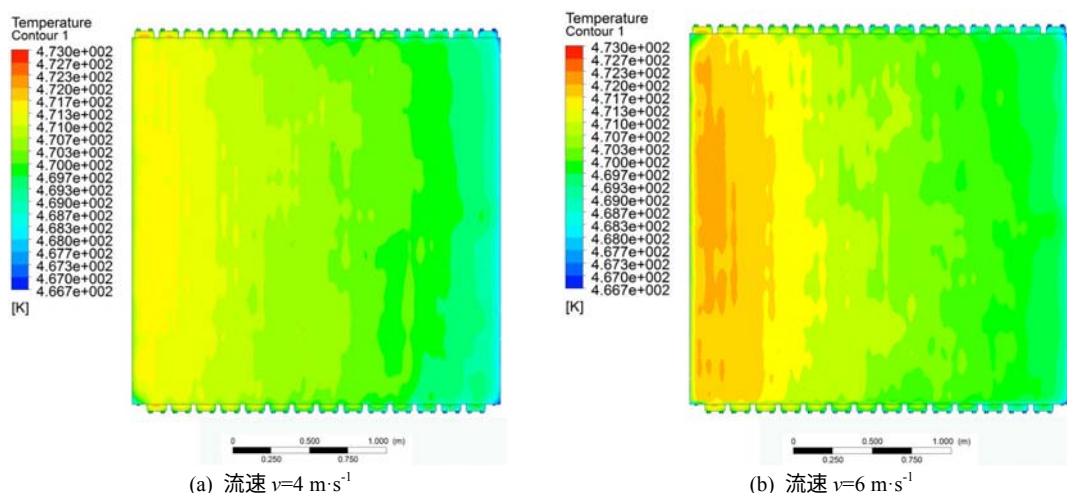


图11 不同流速对热板传热的影响

通过分析图10中不同加热方式节点随温度变化的曲线可看出,电加热温度时间曲线呈凹形,温度开始升温较慢,之后逐渐加快;到结束时,温度升高至 190.431°C ;而煤油加热升温曲线呈凸形,温度开始升温较快,之后逐渐变缓;到280步左右时,已接近最终温度;最终400步结束时,温度升高至 196.6°C 。分析表明,导热油加热较电加热升温速率较快,一方面,流体与固体接触充分,热传导效率高;另一方面,在实际工作中,电加热热管与热管孔中间存在缝隙,热能存在一定损失,且电能利用率低,从而导致能源利用率不高。由此可见,利用热油泵循环供应的导热油进行加热,有利于提高热板表面温度均匀性,且能节省能源。

3 流速与导热油传热效率分析

热板导热油加热属于强制对流传热中的内部流动,在流体传热过程中,流速越大,则湍流运动越强烈,湍流时流体内存在强烈的脉动和旋涡,使各部分流体之间迅速混合。流体湍流时的热量传递除导热之外,主要靠流体宏观的湍流脉动,因此湍流传热比层流对流传热强烈^[11]。

流速越大则湍流运动越强烈,流速的变化对对流换热的强弱影响很大,为了分析煤油流速对热板加热速率及表面温度均匀性的影响,分别对 $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 流速的热板传热情况进行模拟分析,模拟结果如图11(a)和(b)所示,

从图11(a)中可以看出,在原有 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 流速基础上提高流速至 $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,热板表面均匀性得到了明

显改善,进出口处温差明显降低。从图11(b)中还可以看出,速度由 $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 增加至 $6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 后,导热油入口区域表面温度升高,出口区域表面温度有所改善。表明导热油入口流速越快,传热速度就越快,表面的温度差异也越小;但入口流速应控制在合理范围,当超过一定范围,会导致升温过快过高,不利于温度场保持均匀性。因此,需根据热板入口孔径及热板尺寸的不同,以及热油泵流量的范围来合理的确定入口流速的可靠值。

4 结论

(1)针对尺寸结构相同的热板案例,导热油加热方式热板表面温差为 9.2°C ,小于电加热方式热板表面温差 12.012°C ;导热油加热热板表面温度均匀性更好。

(2)在升高到指定温度下,导热油加热升温速率大于电加热;导热油可反复循环使用,热能利用率更高。

(3)导热油入口流速对加热速率及表面温度均匀性影响较大,入口流速为 $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时的热板表面温度均匀性较好;实际应用时,针对不同型号热板,应综合考虑热油泵流量范围及热板尺寸后,确定相应的入口流速。

参考文献:

- [1] 王野平,李翠娟,周韩,等.基于FLUENT的热压板通道布置设计优化[J].机械设计,2012,29(3):63-65.
- [2] 武晶晶,董林福,刘岩松.导热油加热大型胶带硫化机热板温度场有限元分析[J].橡胶工业,2013,60(4):239

- 241.
- [3] 吴文山, 刘红. 热管功率分布误差对热板温度场的影响[J]. 宁波大学学报(理工版), 2010, 23(3):113-116.
- [4] 赵镇南. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008: 43-44.
- [5] 刘红, 阮灵伟, 蒋兰芳, 等. 基于 ANSYS 的热板温度场模拟与优化设计[J]. 模具工业, 2010, 36(9):18-21.
- [6] 刘彦丰, 高正阳, 梁秀俊. 传热学[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015:55.
- [7] 张素梅. 热压板孔道结构及其传热仿真分析[J]. 福建林学院学报, 2013, 33(4):367-370.
- [8] 尹延国, 俞建卫, 王永国, 等. 温压模具感应加热温度场的有限元模拟分析[J]. 中国机械工程, 2011, 22(5): 611-615.
- [9] 吴限. 热压板的气道设计及安装[J]. 木工机床, 1996(4): 18.
- [10] 李丽丹, 李声. 基于 CFX 和 Workbench 的数值仿真技术[J]. 中国测试, 2010, 36(5):80-83.
- [11] 窦建培. SYSC-F01 型层压机加热系统的热力学分析与研究[D]. 河北: 燕山大学, 2012.

Comparative analysis: Simulation of electrical heating and oil heating of hot plate using ANSYS Workbench

YANG Bin¹, SUN Bao-shou¹, ZHANG Ya-ling², ZHANG Hui-bin²

(1.Faculty of Mechanical Engineering & Mechanics, Ningbo 315211, China;

2.Dong Yu (Ningbo) Hydraulic Industries Co. Ltd, Ningbo 315200, China)

Abstract: In order to improve the uniformity of temperature field distribution on the surface of the heated area of the hot plate used for press vulcanizers, the finite element simulation is carried out on the hot plate of 75 mm×2 400 mm×2 400 mm. ANSYS Workbench software is used to simulate electric heating and the heating of heat transfer oil for hot plate respectively, and comparative analysis is conducted accordingly. The results show that when the same piece of hot plate is heated to the operating temperature of about 190 °C, the surface temperature difference of the electrical heating is 12.012 °C, whereas the surface temperature difference of heat transfer oil heating for the plate is 9.2 °C. The results of simulation show that the surface temperature uniformity of the hot plate heated by heat transfer oil is better and heating rate is higher. The uniformity of temperature field is improved obviously when inlet velocity is 4 m·s⁻¹.

Key words: hot plate; electric heating; heat transfer oil heating; Workbench software

(责任编辑 章践立)